

УДК 550.42:552.323.6

## РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ICP–MS–ГЕОХИМИЯ) В КИМБЕРЛИТАХ ЯКУТИИ

© 2003 г. Ю. Ю. Голубева, И. П. Илупин, Д. З. Журавлев

Представлено академиком И.Д. Рябчиковым 15.03.2003 г.

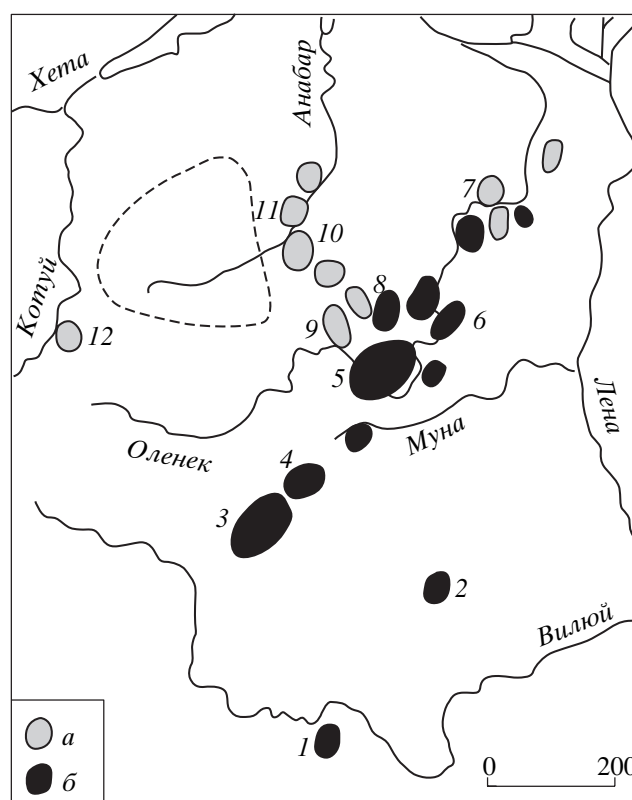
Поступило 21.03.2003 г.

Данное сообщение посвящено результатам первого систематического исследования редкоземельного состава в 40 образцах кимберлитов из 12 полей Якутии (табл. 1) (каменный материал по кимберлитам Якутии был подготовлен И.П. Илупиным). До настоящей работы геохимия редкоземельных элементов обсуждалась лишь для единичных трубок и полей данной провинции [1, 2, 7].

Анализ редкоземельных элементов выполнен методом ICP–MS (аналитик Д.З. Журавлев, ИМГРЭ). Анализировались как автолитовые кимберлитовые брекчии, так и порфировые кимберлиты. Так как кимберлиты обычно содержат материал прорываемых ими пород, то при подготовке проб ксеногенный материал тщательно удалялся. Контроль низкоконтаминированных кимберлитов осуществлялся с использованием коэффициента контаминации ( $C.I. = (SiO_2 + Al_2O_3 + Na_2O)/(2K_2O + MgO)$ ), который, согласно рекомендациям [3], для слабо контаминированных неслюдяных разностей кимберлитов должен составлять  $<1.5$  (табл. 1).

Принято выделять северную и южную части Якутской кимберлитовой провинции. Кимберлиты севера провинции являются убогоалмазоносными, имеют как палеозойский, так и мезозойский возраст и образуют две ветви: северо-восточную и северо-западную (рис. 1) [4]. Кимберлиты юга провинции имеют палеозойский возраст и варьируют от высоко- до убогоалмазоносных. Основная задача исследований состояла в сравнительной характеристике редкоземельного состава кимберлитов полей юга и севера провинции,

выявлении отличий как между полями палеозойского и мезозойского возраста, так и между алмазоносными и не алмазоносными кимберлитами, с целью получения информации об их источниках.



**Рис. 1.** Схема расположения кимберлитовых полей на территории Якутской кимберлитовой провинции (пронумерованы поля кимберлитов, которые анализировались в данной работе). а, б – поля развития кимберлитов и кимберлитоподобных пород мезозойского (а) и палеозойского (б) возраста. Цифрами на карте обозначены поля: 1 – Мирнинское, 2 – Накынское, 3 – Алакитское, 4 – Далдынское, 5 – Чомурдахское, 6 – Верхне-Моторчунское, 7 – Куойское, 8 – Лучаканское, 9 – Мало-Куонамское, 10 – Средне-Куонамское, 11 – Нижне-Куонамское, 12 – Харамайское. Штриховой линией обозначена граница Анабарского щита.

*Институт рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии*

*Российской Академии наук, Москва*

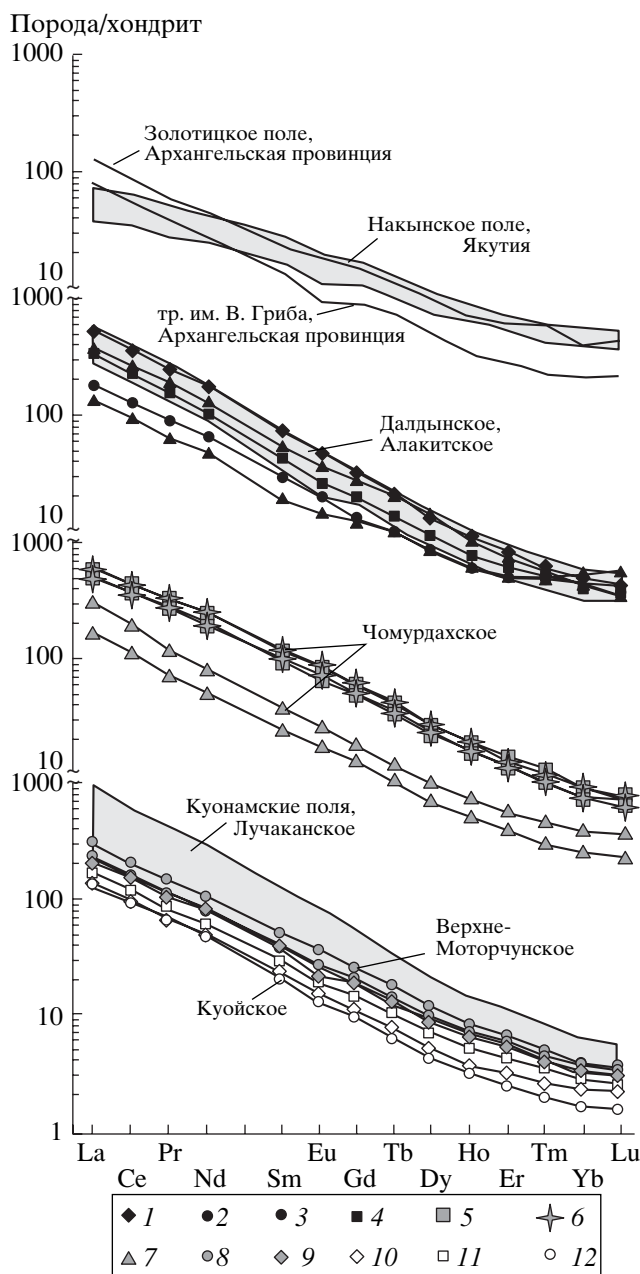
*Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, Москва*

*Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, Москва*

Таблица 1. Содержание редких земель в кимберлитах Якутии

№ п.п		Поле	Трубка	№ обр.	Фаза	C.I.	ΣREE, ppm	(La/Yb) <sub>N</sub>	
1	Южные, палеозойские	Мирнинское	Интернациональная	ИНС-11-230	ПК	1.01	461	112.5	
2		Алакитское	Молодость	МОЛ-29-580	ПК	0.90	518	107.7	
3		Далдынское	Удачная-Восточная	УС-225-376	ПК	0.92	295	97.6	
4			Дальняя	ДЛС-7-20	ПК	1.08	243	96.6	
5			Осенняя	0-16	АКБ	1.14	262	76.8	
6			Зарница	З-13	АКБ	1.16	292	84.1	
7			То же	З-141	АКБ	1.09	351	110.4	
8		Накынское	Ботуобинская	Б-16/4-415	АКБ	1.50	83	17.8	
9			То же	Б-16/4-210	ПК	1.20	75	15.8	
10			»	Б-16/4-270	ПК	1.16	74	16.7	
11			»	Б-16/4-350	ПК	1.14	149	28.5	
12	Северные, палеозойские	Чомурдахское	Чомур	Ч-6	АКБ	1.11	484	64.3	
13			То же	Ч-10	АКБ	1.20	577	63.4	
14			Светлая	СЛ-71-02	ПК	1.04	599	69.2	
15			То же	СЛ-73-129	АКБ	1.03	500	70.0	
16			Надежная	Н-15-51	ПК	0.94	152	73.4	
17			То же	Н-17-2	АКБ	0.92	245	87.1	
18		Верхне-Моторчунское	Аэрогеологическая	АГ-127	АКБ	1.06	276	74.3	
19				То же	АГ-5/14	АКБ	1.25	226	31.1
20				Дайка ан.12	12/5-5	Дайка	1.43	485	58.4
21				Дайка ан.1	1/6-1	Дайка	1.44	423	63.9
22		Сестра-19	С-19/1-1	АКБ	1.07	206	60.8		
23	Северные, мезозойские	Мало-Куонамское	Малокуонамская	МКН-3430	АКБ	1.17	830	162.5	
24		Нижне-Куонамское	Мачала	МЧ-2297	АКБ	1.22	220	44.3	
25			Майская	МИ-5311	АКБ	1.03	376	88.2	
26		Средне-Куонамское	Небайбыт	НБ-4	АКБ	1.19	432	80.1	
27			Харахтах	ХХ-178	АКБ	1.53	304	51.1	
28		Куойское	Дьянга	Дн-1/30	АКБ	1.06	127	51.7	
29			Мгришница	МШ-73-113	АКБ	1.31	164	56.8	
30			Русловая	Р-79-1	ПК	0.89	132	81.6	
31		Лучаканское	Лыхчан	ЛХ-21-05	ПК	1.28	615	97.1	
32			То же	ЛХ-138-17	АКБ	1.26	540	87.1	
33			Дама	ДМ-20-05	АКБ	1.27	221	59.6	
34			То же	ДМ-23-Н	АКБ	1.14	274	70.2	
35			Поздняя	П-00-02	АКБ	1.25	375	77.5	
36			То же	П-88	АКБ	1.26	450	80.7	
37		Харамайское	Улахан-7	ЕПС-58-660	ПК	0.99	562	82.8	
38			Базовая-2	ЕПС-90-1360	ПК	0.94	727	147.3	
39			Биллях-4	ЕПС-110-1770	ПК	0.79	843	158.3	
40			Лесная-1	ЕПС-111-830	ПК	1.10	490	101.1	

Примечание. ПК – порфиновые кимберлиты; АКБ – автолитовые кимберлитовые брекчии.



**Рис. 2.** Нормализованное к хондриту [5] распределение редкоземельных элементов в наиболее представительных образцах кимберлитов. 1–4 – высокоалмазные кимберлиты юга Якутской провинции, Мирнинское поле: 1 – Интернациональная, 2 – Мир [7]; Алаkitское поле: 3 – Айхал [1, 7]; Далдынское поле: 4 – Удачная-Восточная. 5–12 – убогоалмазные кимберлиты севера Якутской провинции: 5–9 – палеозойского, 10–12 – мезозойского возраста; Чомурдахское поле: 5 – Чомур, 6 – Светлая, 7 – Надежная; Верхне-Моторчунское поле: 8 – Аэрогеологическая, 9 – Сестра-19; Куойское поле: 10 – Дьянга, 11 – Мгришница, 12 – Русловая.

Большинство кимберлитов значительно обогащены редкоземельными элементами. Как видно из диаграммы (рис. 2), содержание La в кимберлитах Якутии варьирует и в 100–1000 раз превыша-

ет концентрации этого элемента в хондритах. Исключение составляют кимберлиты Накынского поля, в которых величина  $La_N$  изменяется от 57 до 96, что составляет одну из уникальных особенностей кимберлитов данного поля. Похожие величины  $La_N$  (82–133) встречены лишь в кимберлитах трубок Золотицкого поля и трубки им. В. Гриба (Верхотинское поле) в Архангельской провинции [6]. Отношение  $(La/Yb)_N$  в кимберлитах Накынского поля колеблется от 15.8 до 28.5, в кимберлитах Золотицкого и Верхотинского полей 36–44.

Кимберлиты юга Якутской провинции, особенно Далдынского поля, обладают выдержанным составом редких земель. Суммарное количество редких земель здесь колеблется от 243 до 351 ppm, а отношения  $(La/Yb)_N$  – от 76.8 до 110.4. Два образца кимберлитов Алаkitского (трубка Молодость) и Мирнинского (трубка Интернациональная) полей обладают несколько повышенными содержаниями редких земель (см. табл. 1) по сравнению с кимберлитами Далдынского поля. Согласно [2], в кимберлитах трубки Интернациональная повышена сумма редкоземельных элементов (432–620 ppm) по сравнению с трубкой Мир, в которой сумма составляет 171 ppm. Суммарное содержание REE в кимберлитах Алаkitского поля (трубка Айхал) по [2] колеблется от 127 до 798 ppm. Таким образом, кимберлиты Алаkitского поля сопоставимы с кимберлитами Мирнинского поля и обладают несколько повышенными содержаниями редкоземельных элементов и повышенным отношением  $(La/Yb)_N$ .

Итак, в пределах южной части Якутской провинции можно выделить две группы полей: с повышенными содержаниями REE в кимберлитах трубок Мирнинского и Алаkitского полей и со значительно пониженными содержаниями REE (Накынское поле). Кимберлиты Далдынского поля занимают промежуточное положение между двумя перечисленными группами. Алмазные кимберлиты южных полей (см. табл. 1, рис. 2) обладают значительным разбросом в области легких редкоземельных элементов ( $\Sigma REE_{La-Nd}$  от 62.9 ppm в трубке Ботуобинская до 433.9 ppm в трубке Интернациональная), разброс концентраций значительно сужается при переходе к тяжелым редкоземельным элементам ( $\Sigma HREE_{Er-Lu}$  соответственно от 1.6 до 2.1 ppm).

Кимберлиты севера Якутской провинции образуют две ветви – северо-восточную и северо-западную. К северо-западной ветви относится группа полей мезозойского возраста, располагающихся в бассейне р. Куонамки, – это Мало-Куонамское, Лучаканское, Средне-Куонамское и Нижне-Куонамское. Северо-восточная группа включает как палеозойские Чомурдахское и Верхне-Моторчунское поля, так и мезозойское Куойское поле.

Кимберлиты северо-восточной и северо-западной ветвей отчетливо различаются по содержанию редкоземельных элементов (рис. 2), независимо от возраста пород. Отличительной чертой северо-западных кимберлитов является повышенное содержание  $\Sigma\text{HREE}$  (1.7–3.3 ppm) по сравнению с южными кимберлитами (1.2–2.5 ppm). На фоне остальных северных полей Якутии группа Куонамских полей и Лучаканское поле обладают повышенными суммарными содержаниями редкоземельных элементов ( $\Sigma\text{REE}$  от 220 до 615 ppm) и повышенными отношениями  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  (44.3–88.2). Исключительно высокими для данной группы суммарными содержаниями REE (830) и  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 162.5$  обладает трубка Малокуонамская. Для кимберлитов Лучаканского поля (см. табл. 1) выявлены вариации содержаний REE и уменьшение их суммарного количества в ряду трубок Лыхчан → Поздняя → Дама. Содержание  $\Sigma\text{LREE}$  в кимберлитах Лучаканского поля колеблется от 205.6 до 574.9 ppm (до 402.2 ppm в кимберлитах Куонамских полей, 783.7 ppm в трубке Малокуонамская), что сближает кимберлиты данной группы с южными кимберлитами Якутии ( $\Sigma\text{LREE}$  от 229.1 до 488.3 ppm), исключая Накынское поле.

Куойское и Верхне-Моторчунское поля северо-восточной группы характеризуются пониженными содержаниями редкоземельных элементов (см. рис. 2):  $\Sigma\text{REE}$  колеблется здесь от 127 до 276, а отношение  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  от 31 до 82. Как отмечалось ранее [8], Куойское поле обладает рядом своеобразных особенностей. В частности, специфическая черта кимберлитов Куойского поля состоит в наличии обильных реликтов неизмененного оливина и в высоком содержании пиропса, что является сравнительно редким для кимберлитов севера провинции. Кимберлиты Куойского поля обладают наиболее низкими содержаниями как  $\Sigma\text{LREE}$  (117.5–151.2 ppm), так и  $\Sigma\text{HREE}$  (0.8–1.3 ppm) среди южных и северных кимберлитов Якутии. При этом по содержанию  $\Sigma\text{LREE}_N$  кимберлиты Куойского поля похожи на кимберлиты Накынского поля (62.9–129.7 ppm), а также на кимберлиты Золотицкого и Верхотинского полей Архангельской провинции (72.2–115.8 ppm), а по содержанию  $\Sigma\text{HREE}_N$  они близки кимберлитам трубки им. В. Гриба (Верхотинское поле, Архангельская провинция).

Среди кимберлитов Верхне-Моторчунского поля нами были изучены как трубки, так и дайки, при этом дайки данного поля отличаются от трубок как по минералогии, так и по особенностям химического состава. Кимберлиты трубок обладают умеренными содержаниями редкоземельных элементов, сравнимыми с кимберлитами Далдынского поля юга Якутской провинции. Высокими содержаниями REE, не характерными для трубок северо-восточной группы северных ким-

берлитов, обладают дайки Верхне-Моторчунского поля (см. табл. 1). При этом содержание  $\Sigma\text{LREE}$  здесь (389.5–431.8 ppm) похоже на концентрации легких редких земель в кимберлитах Алакитского, Мирнинского полей, а также некоторых трубок северо-западной группы. В то же время содержания  $\Sigma\text{HREE}$  в дайках Верхне-Моторчунского поля (3.4–6.6 ppm) являются самыми высокими среди кимберлитов Якутии.

Чомурдахское поле (см. рис. 2) обладает очень неоднородным составом  $\Sigma\text{REE}$  (152–599 ppm),  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 63.4–87.1$ . Графики распределения редкоземельных элементов в трубках Чомур и Светлая практически совпадают; по содержанию  $\Sigma\text{LREE}$  (444.6–550.1 ppm) и  $\Sigma\text{HREE}$  (3.5–4.3 ppm) они похожи на дайки Верхне-Моторчунского поля. Трубка Надежная по содержаниям легких и тяжелых редких земель близка к кимберлитам Куойского поля.

Что касается кимберлитов Харамайского поля, расположенного на западной окраине Анабарского щита и, возможно, не относящегося к Якутской провинции (см. рис. 1), то они обладают повышенными содержаниями  $\Sigma\text{REE}$  (490–843 ppm), отношение  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  колеблется от 82.8 до 158.3. В этом они похожи на кимберлиты Мирнинского и Алакитского полей.

В заключение подчеркнем:

1) основное отличие южных кимберлитов – устойчиво умеренное содержание  $\Sigma\text{HREE}$  (1.2–2.5 ppm), в то время как в северных кимберлитах наблюдается значительный разброс содержаний тяжелых редких земель ( $\Sigma\text{HREE}$  0.8–6.6 ppm);

2) выявлены отличия между двумя ветвями северных кимберлитов: породы северо-западной группы обладают повышенными содержаниями REE, тогда как среди кимберлитов северо-восточной группы встречаются трубки с пониженным содержанием REE (кимберлиты трубок Куойского и Верхне-Моторчунского полей);

3) поля северо-восточной группы (Верхне-Моторчунское и Чомурдахское поля), как и Мирнинское и Алакитское поля юга провинции, являются очень неоднородными;

4) содержание редких земель в кимберлитах Накынского поля Якутской провинции и в кимберлитах Золотицкого и Верхотинского полей Архангельской провинции близки; для кимберлитов Якутии впервые установлено сходство концентраций REE между кимберлитами Куойского и Накынского полей.

Рассмотренные вариации распределения редкоземельных элементов в кимберлитах Якутии предоставляют еще одно свидетельство неоднородности их мантийных источников, проявляющейся иногда даже в пределах одного поля.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 03-05-64214 и 03-05-06020) и гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ № 00-15-98560.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серов И.В., Гаранин В.К., Зинчук Н.Н., Ротман А.Я. // Петрология. 2001. Т. 9. № 6. С. 657–670.
2. Серов И.В., Гаранин В.К., Зинчук Н.Н. и др. Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж, 2003. С. 339–346.
3. Taylor W.R., Tompkins L.A., Haggerty S.E. // *Geochim. et cosmochim. acta*. 1994. V. 58. P. 4017–4037.
4. Илупин И.П., Геншафт Ю.С. // ДАН. 1994. Т. 338. № 2. С. 207–210.
5. McDonough W.F., Sun S.S. // *Chem. Geol.* 1995. V. 120. P. 223–253.
6. Богатилов О.А., Кононова В.А., Первов В.А., Журавлев Д.З. // Петрология. 2001. № 3. С. 227–241.
7. Nowell G.M., Kempton P.D., Pearson D.G. Extended abstrs VII Intern. Kimberlite Conf. Cape Town, 1998. P. 631–633.
8. Илупин И.П. // *Отч. геология*. 1997. № 6. С. 24–28.